



## ESTUDO EXPERIMENTAL DA VARIÂNCIA DA TEMPERATURA EM TUBOS CIRCULARES COM PROMOTORES DE TURBULÊNCIA INTERNOS

Rosa L. D. Blanco & Sergio V. Möller

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS



### RESUMO

*Este trabalho apresenta o estudo experimental das flutuações de temperatura no escoamento de ar em um duto de seção circular aquecido, com promotores de turbulência internos, os quais consistem de helicóides de cobre de diferentes diâmetros. Microtermopares são utilizados para as medições de temperatura e de suas flutuações. A aquisição e análise estatística dos dados é realizada por meio de um Analizador de Fourier. Os resultados experimentais para tubos com promotores internos é comparado com os resultados obtidos em tubos lisos, sendo feita a análise do comportamento da variância através da distribuição das escalas de turbulência para a flutuação da temperatura.*

### INTRODUÇÃO

Promotores de turbulência são dispositivos utilizados em equipamentos de troca de calor com o intuito de produzir, ou intensificar, o processo turbulento em um escoamento, aumentando a mistura e, conseqüentemente, melhorando a troca térmica nesses equipamentos. O conhecimento dos processos de transferência de calor nessas condições é, portanto, necessário para o desenvolvimento e aplicação de promotores de turbulência em equipamentos de troca de calor.

A análise termo e fluidodinâmica é feita através da solução das equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia. Resultados experimentais são de grande valia para a elaboração de modelos visando a solução destas equações (Karam e Möller, 1991; Oliveski e Möller, 1995). A descrição do comportamento das flutuações de velocidade e temperatura, servem, também, de subsídio para o desenvolvimento e avaliação de novos métodos de solução destas equações (Grötzbach, 1987), uma vez que as leis que descrevem as características médias de velocidade para o escoamento, com ou sem transferência de calor, e para a temperatura, tanto em tubos como na camada limite, tem sido amplamente estudadas e comprovadas, devendo-se citar o clássico trabalho de Nikuradse (1930) e, mais recentemente, Zukauskas e Slanciauskas (1987) e Kirillov e Levchenko (1989).

A introdução de rugosidades ou promotores de turbulência em dutos ou canais, e suas conseqüências, tem sido objeto de estudos de diferentes autores, desde o próprio Nikuradse (1950) e, mais recentemente, Rehme (1978), Chiou (1987) e Kim e Webb (1993). Estes trabalhos mostram, em linhas gerais, as características dos parâmetros envolvidos e confirmam o fato de que a inserção de rugosidades ou promotores de turbulência, aumenta a taxa de transferência de quantidade de movimento, e, nos dutos aquecidos, de calor.

A análise de escoamentos turbulentos é feita, classicamente adotando-se a hipótese de Reynolds, segundo a qual, separa-se a média temporal das componentes dos campos de velocidade e de pressão da parte flutuante dessas quantidades. Nos problemas onde ocorre transferência de calor, também a temperatura é dividida em sua parte média temporal e sua parte flutuante (Hinze, 1975). Devido as características aleatórias das flutuações, a análise estatística destes parâmetros faz-se necessária.

O objetivo deste trabalho é realizar a análise experimental da variância das flutuações de temperatura em

escoamento turbulento em um duto circular aquecido e com helicóides internos. Com este fim, as funções de densidade autoespectral e autocorrelação são utilizadas para se obter informações sobre as escalas de comprimento e de tempo, bem como sobre a natureza do processo de transferência de calor neste tipo de geometria, comparando-se com os resultados obtidos em dutos circulares lisos (Blanco, 1996).

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A seção de testes consiste em um tubo de cobre de 40 mm de diâmetro interno e 5,0 m de comprimento dos quais 1,2 m são aquecidos eletricamente, correspondendo a região da descarga do ar que é insuflado por meio de um ventilador centrífugo. Os perfis de velocidade e de temperatura foram medidos radialmente a uma seção, aproximadamente 30 mm antes da descarga, no interior do tubo. O perfil de velocidade foi medido por meio de um tubo de Pitot de diâmetro externo de 1,3 mm. A temperatura e suas flutuações foram medidas por intermédio de microtermopares, construídos e calibrados para esta finalidade (Blanco e Möller, 1992). A parte flutuante da temperatura é amplificada e seu comportamento estudado através de um analisador de Fourier, Bruel&Kjaer, modelo 2034. Durante os experimentos um termopar é colocado fixo no centro do tubo, enquanto que o outro é deslocado radialmente da parede para o centro do tubo. O posicionamento do tubo de Pitot, bem como o do termopar na posição variável, é feita através de um posicionador micrométrico.

A utilização do analisador de Fourier permite o estudo do sinal dos termopares através de funções estatísticas de autoespectros e correlações. A observação do registro da temperatura no tempo é realizada em uma faixa de frequência de 0 Hz a 200 Hz. Os registros das funções foram feitos para um intervalo de 2,0 Hz a 200Hz, eliminando-se assim o sinal DC (0 Hz), que aparece no início da escala. As funções de autoespectro foram obtidas através de amostragens de 500 blocos, cada qual com 1024 elementos.

Para minimizar-se a influência da frequência da rede (60 Hz), fez-se uma retificação trifásica da entrada de alimentação do aquecimento da bancada, atenuando-se a frequência de 60 Hz e dando origem a uma frequência de 360 Hz, e suas harmônicas, já fora do intervalo de frequências de interesse. A tensão resultante desta conversão e aplicada à resistência foi de 206 V, sendo o valor da resistência de 34  $\Omega$ .



Os promotores de turbulência foram construídos através da introdução de helicóides de fio de cobre com diferentes diâmetros e um passo de aproximadamente 30 mm cada. Uma vista esquemática da parte aquecida da seção de testes bem como dos promotores de turbulência está mostrada na Figura 1. A Tabela 1 lista as geometrias de helicóides utilizadas bem como as condições do escoamento investigadas.

Os parâmetros básicos obtidos nos experimentos foram determinados a partir de cálculos efetuados com um programa computacional desenvolvido para este fim (Brancher et al. 1993).

Tabela 1 Características dos escoamentos investigados:

e/R	e mm	aquecimento	Re	fator de atrito - $\lambda$
0,0	0,0	não	$5,4 \cdot 10^4$	0,021
		sim	$3,81 \cdot 10^4$	0,020
0,09	1,8	não	$2,26 \cdot 10^4$	0,038
		sim	$2,39 \cdot 10^4$	0,063
0,11	2,2	não	$1,99 \cdot 10^4$	0,068
		sim	$2,70 \cdot 10^4$	0,115
0,14	2,8	não	$1,83 \cdot 10^4$	0,27
		sim	$2,60 \cdot 10^4$	0,204

### RESULTADOS

A Figura 2 apresenta o perfil de velocidade adimensional logarítmico  $U^+$ , como função da posição adimensional  $y^+$  em todas as medições descritas na Tabela 1. A curva teórica mostrada nesta Figura, para referência dos valores, corresponde à clássica "Lei da Parede" para o escoamento isotérmico em dutos circulares lisos estabelecida por Nikuradse (1932). Pode-se verificar o efeito produzido pela inserção dos helicóides, mantendo, de forma geral, a mesma inclinação que a curva obtida por Nikuradse para rugosidades produzidas por meio da deposição de grãos de areia no tubo.

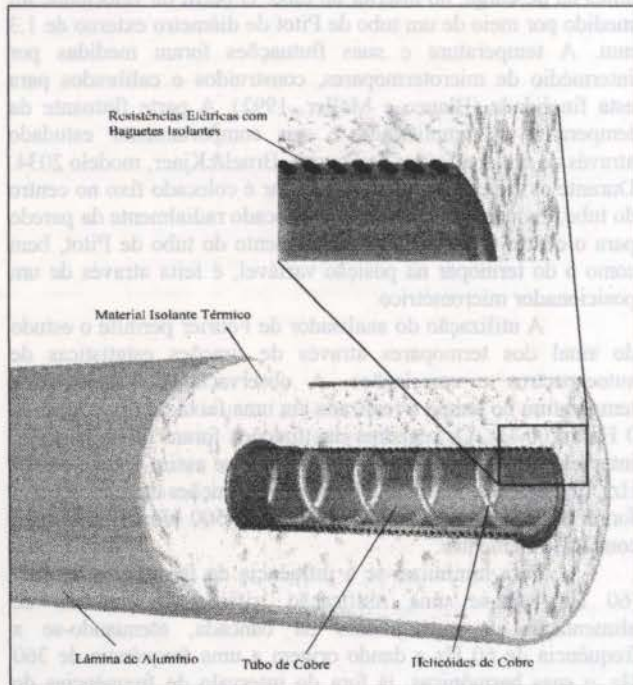
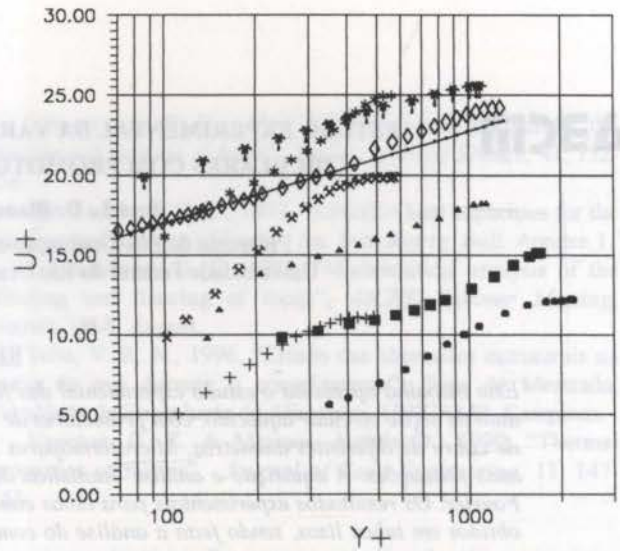


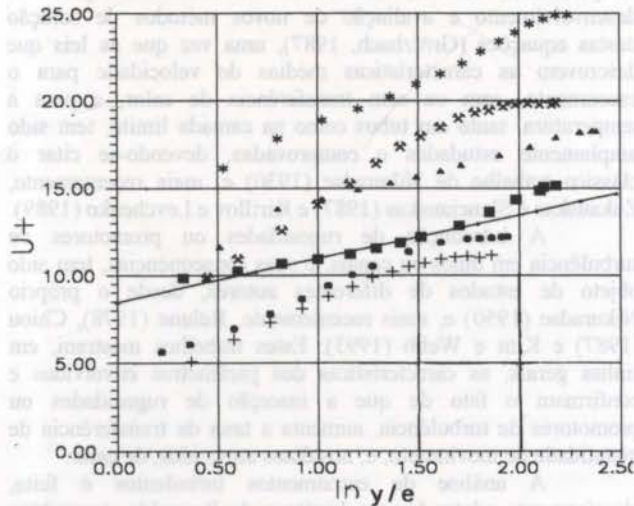
Figura 1: Vista esquemática da seção aquecida, mostrando os promotores de turbulência.



— Curva Teórica (Nikuradse)  
 ◇ duto liso isotérmico  
 \* e/R=0,09 isotérmico  
 x e/R=0,11 isotérmico  
 + e/R=0,14 isotérmico  
 ▲ duto liso e aquecido  
 ▲ e/R=0,09 aquecido  
 ■ e/R=0,11 aquecido  
 ● e/R=0,14 aquecido

Figura 2. Perfil de velocidade adimensional logarítmico, comparado com a "Lei da Parede" de Nikuradse (1932) para tubos lisos.

Os mesmos resultados, com exceção dos tubos lisos, estão mostrados na Figura 3 como função da posição  $y/e$ . A curva teórica corresponde, neste caso à curva sugerida por Nikuradse (1950) para tubos rugosos.



— Curva Teórica (Nikuradse)  
 \* e/R=0,09 isotérmico  
 x e/R=0,11 isotérmico  
 + e/R=0,14 isotérmico  
 ▲ e/R=0,09 aquecido  
 ■ e/R=0,11 aquecido  
 ● e/R=0,14 aquecido

Figura 3. Perfil de velocidade adimensional comparado com a lei de distribuição de velocidade de Nikuradse (1950) para tubos rugosos.



O perfil de temperatura adimensional  $T^+$ , como função da posição adimensional  $Y+t$ , sendo  $Y+t$  dado pelo produto de  $Y$  com o número de Prandtl,  $Pr$ , em todas as medições descritas na Tabela 1, está apresentado na Figura 4. A curva teórica mostrada foi proposta por Kirillov e Levchenko (1989) para tubo liso aquecido. Neste caso, constata-se uma concordância dentro de uma faixa de diferença máxima de  $\pm 5\%$ , mesmo para os dados dos tubos rugosos.

A Figura 5 mostra, para várias posições ao longo de um raio, até o centro do duto, a função de autocorrelação do sinal flutuante de temperatura,  $R_{TT}(\tau)$ , definida por

$$R_{TT}(\tau) = \frac{1}{t_b} \int_0^{t_b} T(t). T(t + \tau) dt \tag{1}$$

onde  $t_b$  é um tempo adequado de observação e  $\tau$  o tempo de retardo da função. Estes resultados estão normalizados por meio do valor médio quadrático da flutuação de temperatura

$$C_{TT} = \frac{R_{TT}(\tau)}{R_{TT}(0)} \tag{2}$$

onde  $R_{TT}(0)$  é o valor médio quadrado da flutuação de temperatura para um tempo de deslocamento,  $\tau$ , igual a zero, isto é,

$$R_{TT}(0) = \overline{T'^2} \tag{3}$$

Em geral, as curvas de autocorrelação indicam longos intervalos de tempo (no eixo horizontal tem-se o tempo total de 2,0 s) em que as flutuações de temperatura se correlacionam. Isto indica a existência de grandes escalas de tempo e, consequentemente, de comprimento, para a flutuação da temperatura no escoamento turbulento neste tipo de canal investigado. Pode-se observar, também, que a medida em que se aproxima do centro do tubo, as inclinações das curvas tendem a ficar menos acentuadas, com maiores áreas, principalmente no caso do helicóide de maior diâmetro.

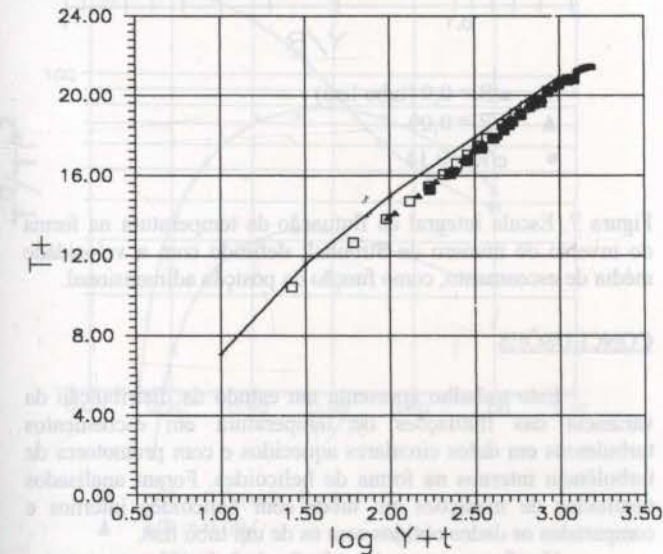


Figura 4. Perfil de temperatura adimensional logarítmico de todas as medições em dutos aquecidos, comparados com a correlação proposta por Kirillov e Levchenko (1989).

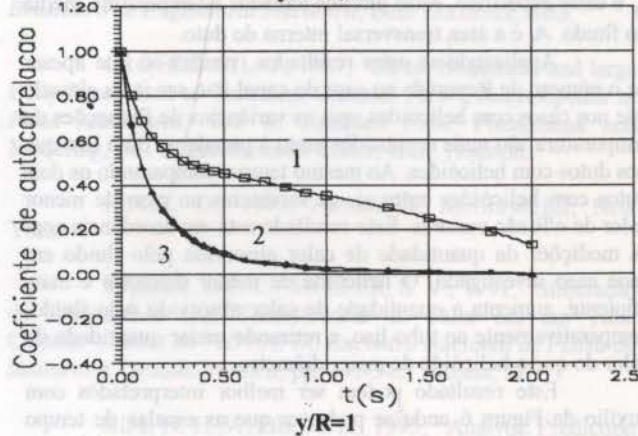
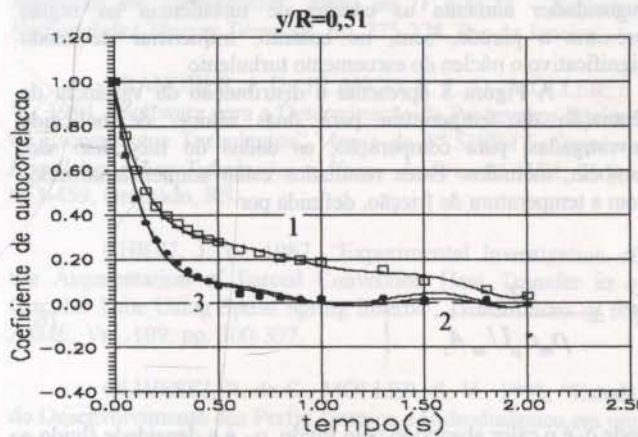
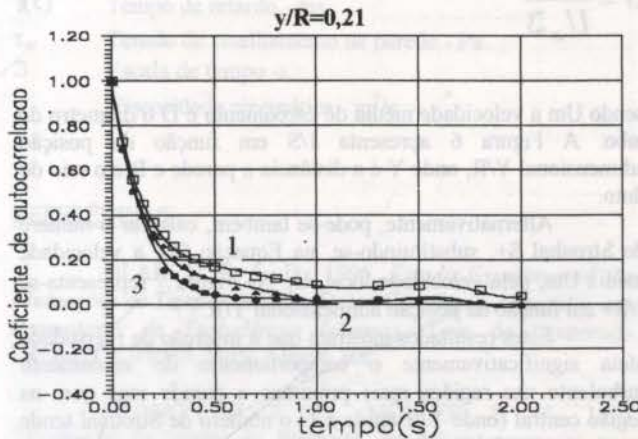
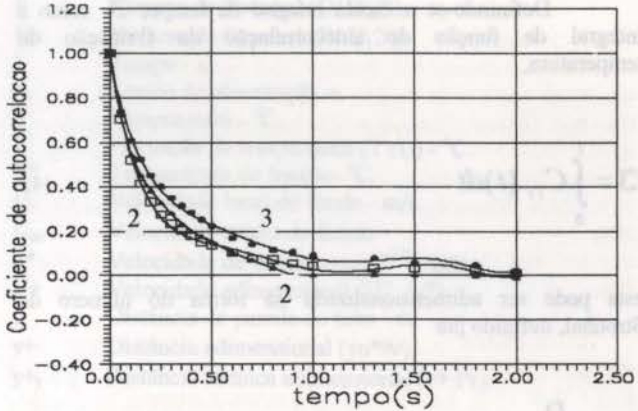


Figura 5. Funções de autocorrelação da flutuação de temperatura normalizadas (1 - tubo liso, 2 -  $e/R=0,09$ , 3 -  $e/R=0,14$ ).



Definindo-se a escala integral de tempo,  $\mathcal{T}$  como a integral da função de autocorrelação da flutuação de temperatura,

$$\mathcal{T} = \int_0^t C_{TT}(t) dt \quad (4)$$

esta pode ser adimensionalizada na forma do número de Strouhal, definido por

$$S = \frac{D}{U_m \mathcal{T}} \quad (5)$$

sendo  $U_m$  a velocidade média do escoamento e  $D$  o diâmetro do tubo. A Figura 6 apresenta  $1/S$  em função da posição adimensional  $Y/R$ , onde  $Y$  é a distância a parede e  $R$  é o raio do duto.

Alternativamente, pode-se também, calcular o número de Strouhal  $S^+$ , substituindo-se, na Equação (5), a velocidade média  $U_m$ , pela velocidade local,  $U_l$ . Na Figura 7 representa-se  $1/S^+$  em função da posição adimensional  $Y/R$ .

Estes resultados mostram que a inserção de rugosidade afeta significativamente o comportamento do escoamento turbulento nas regiões mais próximas a parede mas que, na região central (onde  $Y/R$  tende a 1) o número de Strouhal tende a não ser afetado. Isto demonstra que a introdução de rugosidades aumenta as escalas de turbulência na região próxima a parede, sem, no entanto, influenciar de modo significativo o núcleo do escoamento turbulento.

A Figura 8 apresenta a distribuição da variância da flutuação da temperatura para duas alturas de helicóide investigadas; para comparação, os dados do tubo liso são, também, incluídos. Estes resultados estão adimensionalizados com a temperatura de fricção, definida por

$$T^* = \frac{q_f}{\rho_m c_p U_m A_t} \quad (6)$$

onde  $q_f$  é o calor absorvido pelo fluido,  $\rho_m$  é a densidade fluido e  $c_p$  o calor específico, estes últimos tomados à temperatura média do fluido.  $A_t$  é a área transversal interna do duto.

Analisando-se estes resultados, verifica-se que apesar de o número de Reynolds no caso do canal liso ser mais elevado que nos casos com helicóides, que as variâncias de flutuações de temperatura são mais acentuadas junto à parede no duto liso que nos dutos com helicóides. Ao mesmo tempo, comparando os dois dutos com helicóides entre si, as variâncias no caso de menor valor de  $e/R$  são maiores. Este resultado está em acórdância com as medições da quantidade de calor absorvida pelo fluido em cada caso investigado. O helicóide de menor diâmetro é mais eficiente, aumenta a quantidade de calor absorvido pelo fluido, comparativamente ao tubo liso, e retirando maior quantidade de calor do que o helicóide de maior diâmetro.

Este resultado podem ser melhor interpretados com auxílio da Figura 6 onde se pode ver que as escalas de tempo para a temperatura, e, conseqüentemente, de tamanho, são comparativamente maiores no helicóide de menor diâmetro que no tubo liso ou em presença de um helicóide maior.

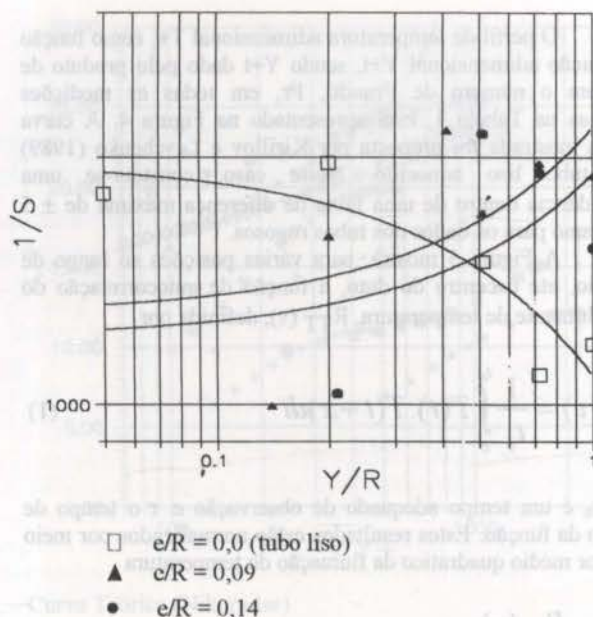


Figura 6. Escala integral da flutuação da temperatura na forma do inverso do número de Strouhal, definido com a velocidade média de escoamento, como função da posição adimensional.

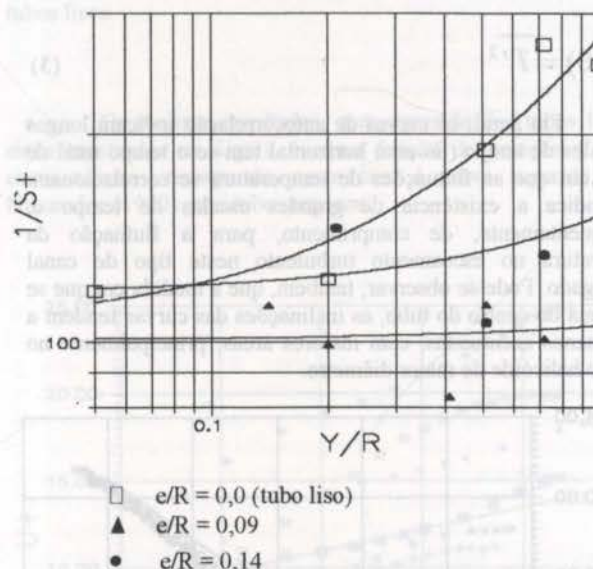


Figura 7. Escala integral da flutuação da temperatura na forma do inverso do número de Strouhal, definido com a velocidade média de escoamento, como função da posição adimensional.

## CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo da distribuição da variância das flutuações de temperatura em escoamentos turbulentos em dutos circulares aquecidos e com promotores de turbulência internos na forma de helicóides. Foram analisados resultados de medições em tubos com helicóides internos e comparados os dados obtidos com os de um tubo liso.

Verifica-se que a introdução de helicóides no interior do duto tende a homogeneizar o gradiente de temperatura radial, devido ao aumento da escala de turbulência, quando comparado com os resultados para o tubo liso.



O aquecimento em um duto com rugosidades artificiais não altera a constante universal (parâmetro angular) da equação da lei da parede determinada por Nikuradse, contudo o seu parâmetro linear é influenciado.

A intensidade de flutuação da temperatura é afetada pela presença da rugosidade em regiões mais próximas da parede, porém na região central do duto esta influência não é tão marcante, com os resultados tendendo para valores semelhantes tanto para o tubo liso como para os tubos com helicóides.

As curvas de autocorrelação apresentam uma forma suave de decréscimo o que leva a concluir que os vórtices responsáveis pelo transporte de calor apresentam tamanhos uniformes, podendo-se fazer uma análise das escalas integrais de tempo a partir das mesmas e representando-as adimensionalmente na forma de números de Strouhal.

A presença de rugosidades diminui o número de Strouhal (aumentando  $1/S$  e  $1/S^+$ ) em regiões junto a parede. Isto indica que, para estas regiões, a escala integral de tempo aumenta com relação ao tubo liso e, consequentemente, aumenta a escala de comprimento. Esta consideração comprova um aumento na escala de turbulência com a presença da rugosidade e, portanto, a retirada de calor é intensificada. Na região central o efeito da rugosidade desaparece e o número de Strouhal tende ao mesmo valor encontrado no tubo liso.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_t$	Área transversal do duto - $m^2$ .
$C_{TT}$	Coefficiente de autocorrelação.
$D$	Diâmetro do duto - m.
$e$	Altura do promotor de turbulência - m.
$Pr$	Número de Prandtl.
$q_f$	Calor absorvido pelo fluido - W.
$R$	Raio do duto - m.
$Re$	Número de Reynolds ( $U_m D/\nu$ ).
$R_{TT}$	Autocorrelação da temperatura - $^{\circ}C^2$ .

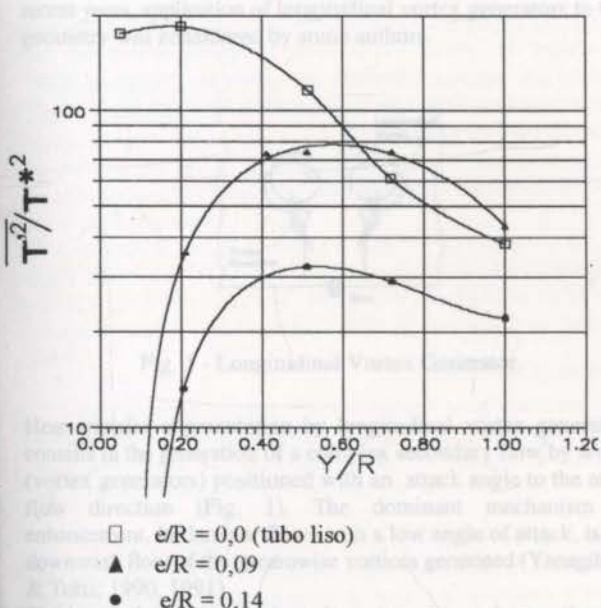


Figura 8. Distribuição da variância da temperatura como função da posição radial do duto.

$S$	Número de Strouhal ( $D/U_m \mathfrak{S}$ ).
$S^+$	Número de Strouhal ( $D/U_1 \mathfrak{S}$ ).
$t$	Tempo - s.
$t_b$	Tempo de observação - s.
$T$	Temperatura - $^{\circ}C$ .
$T'$	Flutuação da temperatura ( $T'(t)$ ) - $^{\circ}C$ .
$T^*$	Temperatura de fricção - $^{\circ}C$ .
$U_1$	Velocidade local do fluido - m/s.
$U_m$	Velocidade média do fluido
$u^*$	Velocidade de fricção $(\tau_w/\rho)^{1/2}$ - m/s.
$U^+$	Velocidade adimensional ( $U_1/u^*$ ).
$y$	Distância da parede do tubo - m.
$y^+$	Distância adimensional ( $yu^*/\nu$ ).
$y_t^+$	Distância térmica adimensional ( $y^+.Pr$ ).
$\tau$	Tempo de retardo - ms.
$\tau_w$	Tensão de cisalhamento na parede - Pa.
$\mathfrak{S}$	Escala de tempo - s.
$\nu$	Viscosidade cinemática - $m^2/s$ .

## REFERÊNCIAS

- BLANCO, R. L. D., 1996, *Estudo Experimental das Flutuações de Temperatura em Dutos Circulares Aquecidos com Promotores de Turbulência Internos*, Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, RS.
- BLANCO, R. L. D., MÖLLER, S. V., 1992, "Avaliação do tempo de Resposta em Microtermopares para Medições em Turbulência", *Anais do IV ENCIT - Encontro Nacional de Ciências Térmicas*, pp. 275-278, Rio de Janeiro.
- BRANCHER, J. D., BLANCO, R. L. D., MÖLLER, S. V., 1994, "Software para a Determinação de Parâmetros Básicos de Escoamentos Turbulentos", *Anais do 8º SIBRAT- Simpósio Brasileiro sobre Tubulações e Vasos de Pressão*, Vol. 2, pp. 453-459, Gramado, RS.
- CHIOU, J. P., 1987, "Experimental Investigation of the Augmentation of Forced Convection Heat Transfer in a Circular Tube Using Spiral Spring Inserts", *Transactions of the ASME*, Vol. 109, pp. 300-307.
- OLIVESKI, R. de C., MÖLLER, S. V., 1995, "Estudo do Desenvolvimento dos Perfis Térmico e Hidrodinâmico em um Duto pelo Método ADI", *Anais do XIII COBEM, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Belo Horizonte, MG.
- GRÖTZBACH, G., 1987, "Direct Numerical and large Eddy Simulation of Turbulent Channel Flow", *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol. 6, Complex Flow: Phenomena and Modeling, N. P. Chermisinoff Editor, Gulf, Houston.
- HINZE, O., 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill, New York.
- KARAM, J. E. C., MÖLLER, S. V., 1991, "Simulação do Escoamento com Transferência de Calor em um Tubo Circular", *Anais do VIII ENFIR, Encontro Nacional de Física de Reatores e Termohidráulica*, pp. 341-345, Atibaia, SP.

KIM, N. H., WEBB, R. L., 1993, "Analytic Prediction of the Function and Heat Transfer for Turbulent Flow in Axial Internal Fin Tubes", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 553-559.



KIRILLOV, D. L., LEVECHENKO, Ju. D., 1989, "Turbulent Temperature Profiles and Heat Exchange Law in Single Phase Flow in Pipes", *Proc. 4th Int. Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*, Vol. 2, pp. 728-733, Karlsruhe.

NIKURADSE, J., 1932, "Gesetzmässigkeit der turbulenten Strömung in glatten Röhren", *VDI-Forschungsheft* 356.

NIKURADSE, J., 1950, "Laws of Flow in Rough Pipes", *NASA Technical Memorandum* 1292, pp. 1-26, USA.

REHME, K., 1978, "The Structure of Turbulent Flow through a Wall Subchannel of a Rod Bundle with Roughened Rods", *KfK 2716*. Kernforschungszentrum-Karlsruhe. Karlsruhe.

ZUKAUSKAS, A., SLANCIAUSKAS, A., 1987, *Heat Transfer in Turbulent Fluid Flows*, Hemisphere, Washington.

## ABSTRACT

This paper presents the experimental study of the temperature fluctuations in a heated circular pipe with helical type internal turbulence promoters made of copper wires with different diameters. Microthermocouples are applied for the measurements of temperature and its fluctuations. Data acquisition and statistical analysis was made by means of a Fourier Analyzer. Experimental results from the measurements in the pipes with internal turbulence promoters are compared with the results obtained in a smooth pipe. The analysis of the behavior of temperature variance is made with help of turbulence scales for the temperature fluctuations.